

酒田港における漂砂の要因分析と予測モデルによる将来予測

山田 凱登*・戸川 弘稀**・川村 浩***・坂井 良輔****・阿部 寛*****

* 前 (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
** (一財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究員
*** (一財) 沿岸技術研究センター 調査役
**** (株) エコー 調査解析部

***** 前 国土交通省 東北地方整備局 酒田港湾事務所 海洋利用調整室 海洋利用調整官

本論文は、酒田港外港地区における防波堤延伸による港内環境の変化と最上川からの影響を踏まえ、港内漂砂を定量的に予測するモデルを構築し、埋没予測を行ったものである。最上川の流下シルトが港口部に堆積し、波や流れで港内に流入・堆積することが酒田港における埋没の主因と推定された。また、既往資料から地形や底質変化、防波堤延伸の影響を分析し、酒田港の一部区域が移動限界水深に達しつつあることを確認した。これにもとづき、冬季と春季を対象に現況、事業完了時、港湾計画完了時の3ケースで予測を行った。

キーワード：港湾埋没、漂砂予測、予測モデル

1. はじめに

本論文は、酒田港における事業進捗に伴う港内環境の変化、および隣接する最上川からの出水による流下土砂の影響を考慮した埋没予測モデルの構築を目的とするものである。

山形県は令和2年8月、「ゼロカーボンやまがた2050」を宣言し、再生可能エネルギーの導入拡大を推進する取り組みとして、地域との共生を目指す「地域協調型」の洋上風力発電の導入に向けた地元調整を進めている。これに関連し、再エネ海域利用法に基づき、2025年1月現在、遊佐町沖が「促進区域」に指定、酒田市沖が「有望な区域」として整理されている。

洋上風力発電による効果を県内に最大限取り込むため、海洋再生可能エネルギー発電設備等の拠点となる港湾、すなわち「基地港湾」としての指定を目指し、酒田港では港湾計画の一部変更(図-1)が行われたり。

基地港湾として機能するためには、洋上風力発電設備の部材を運搬する30,000DWT級の貨物船の利用が想定されており、水域施設の水深の確保が、将来的に重要となる。

事業進展に伴う港内環境の変化に加え、酒田港に隣接する最上川からの流下土砂が酒田港内の維持管理浚渫に与える影響を把握することが課題となる。また、港湾計画の変更を踏まえ、酒田港における現況の港形に加えて、将来的な港形を想定した漂砂予測を行う必要がある。

以上を踏まえ、本論文では第2章において、酒田港の漂砂に関係する各種データの整理と、それに基づく漂砂要因の分析を行う。第3章では、第2章での分析結果に基づき、現状の地形変化特性を考慮した予測モデルの構築を試みる。第4章では、本研究の結論を述べるとともに、維持管理にあたって今後検討すべき課題について言及する。



図-1 酒田港港湾計画図(2023.12)

2. 漂砂要因分析

漂砂要因の分析に使用したデータを表-1に示す。

表-1 漂砂要因分析に用いたデータ一覧

データの種類		データ収集期間
底質データ		S58年度、H7年度、H16年度、H25年度、R2年度実施の調査結果
測量データ/浚渫履歴 /外郭施設施工履歴		1993年～2024年までの19回分
波浪データ	沖波	測量データと同期間 NOWPHAS 酒田の観測データ 欠測時はNOWPHAS 秋田、NOWPHAS 新潟から換算式によりNOWPHAS 酒田に変換
	港内	2022年1月11日～2月11日
河川流量データ		測量データと同期間 水文水質データベース(最上川:両羽橋観測所)の流量データ→欠測時は水位データから変換
空中写真		1949年～2023年までの11時期

2.1 酒田港の波浪状況

酒田港は外洋に接する港湾であるため、波浪外力の整理をはじめに行った。NOWPHAS 酒田の波浪データを図-2に示す。これによると、有義波高 4m 以上の出現率は春季 1.5%、夏季 0.1%、秋季 2.3%、冬季 9.1%と読みとれ、冬季に波高が高くなっていることがわかる。有義波高 4m 以上の高波浪の波向に注目すると、年間を通じて W~NW の波向が卓越しており、それぞれ W28%, WNW47%, NW12%の割合となることから、3 方向で 87%を占めている。

2.2 最上川の出水による港内への影響

両羽橋観測所における河川流量の経年変化(毎時観測値)を図-3に示す。近年は、夏季の出水(梅雨・台風)によるピーク流量の増大傾向があることが分かる。一方で、図-4が示すように最上川の夏季の大規模出水時に最上川河口沖は濁っているものの、酒田港内は濁っていない様子が見られる。これは南防波堤整備により、最上川からの流下土砂(シルト質)の港内への直接的な流入は抑制されているためと考えられる。大規模出水による港内の地形変化への影響を確認するため、航路(-14m)の変化土量(浚渫量を考慮)を算定した(図-5)。測量初期年の 1993 年から現在まではほぼ一定の土量変化速度($9,300\text{m}^3/\text{年}$)であることが確認され、近年増大傾向である夏季の大規模出水に対応するような土量の増加傾向は見られなかった。

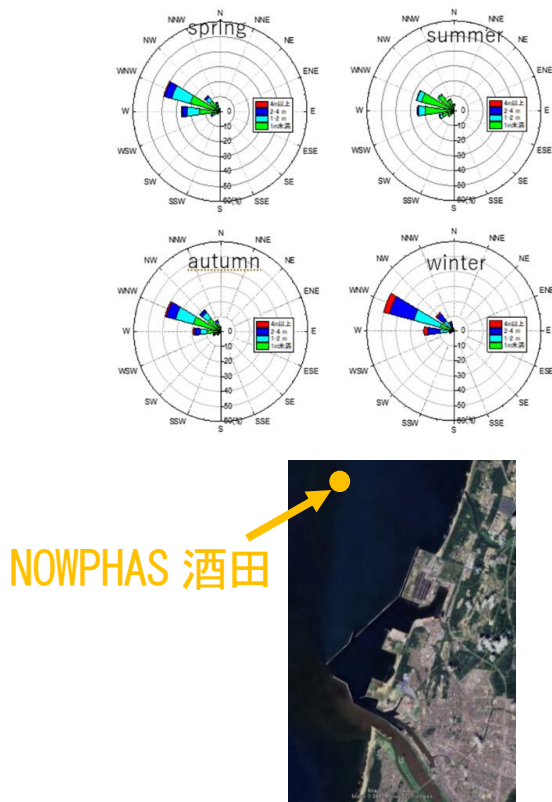


図-2 波向の出現率(1993/1/1~2024/11/14)と酒田港

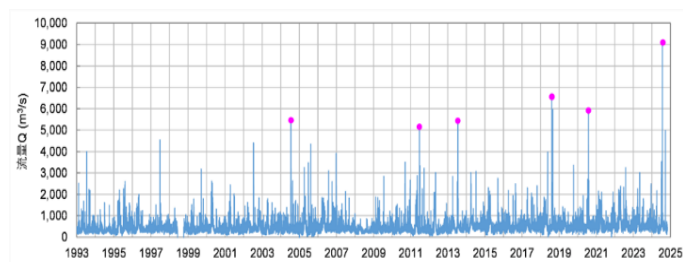


図-3 河川流量の時系列(1993 年~2024 年)



図-4 夏季出水時の最上川河口~酒田港の状況

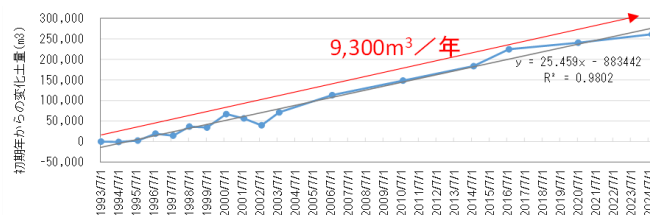


図-5 航路(-14m)の累積変化土量(浚渫量を考慮)

2.3 外郭施設の延伸による港内への影響

図-6は1994～2024年の測量データをもとに5m毎の等深線を凡そ4年毎に重ね合わせたものであり、黒と灰色の矢印は水深-15mの等深線の特徴的な変化を示している。図-7に示した防波堤の整備履歴と等深線の間を分析した。なお、図-7に示す各色の矢印は、それぞれ図-6に示す測深時期における防波堤の先端位置を示す。

黒色の矢印周辺の等深線は2000年代に入り徐々に海浜方向に移動しているものの、2014年以降は移動幅が小さくなる。灰色矢印周辺についても、2000年代に入り徐々に等深線が沖方向へ向かい、2014年以降は移動幅が小さい。すなわち、第二北防波堤および南防波堤の延長が短い年代は、港口部が広く、構造物が地形変化に与える影響が小さいが、その後の防波堤の延伸に伴い地形変化が生じやすくなったと考えられる。そして、2014年以降は、防波堤の延伸過程で外力となる港内の波浪、流れが抑制され、地形変化が小さくなったと推察される。また、過年度業務にて示された高波浪時の海浜流分布の計算例(図-8)に示される南防波堤先端部から港外へ分流していた流れが、南防波堤の延伸により港内へ引き込まれやすくなり、港内へ向かう流れの流速が増加したことも影響している可能性がある。

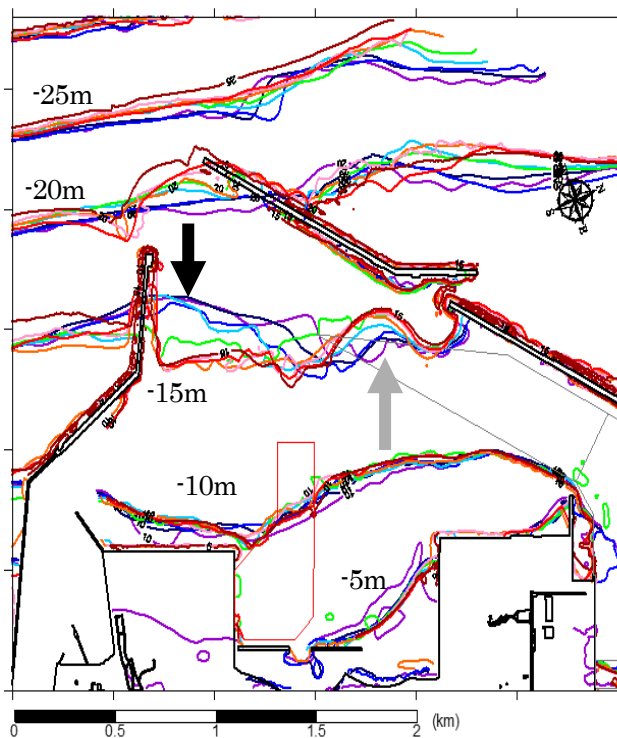


図-6 等深線形状(水深5m毎)の経年変化

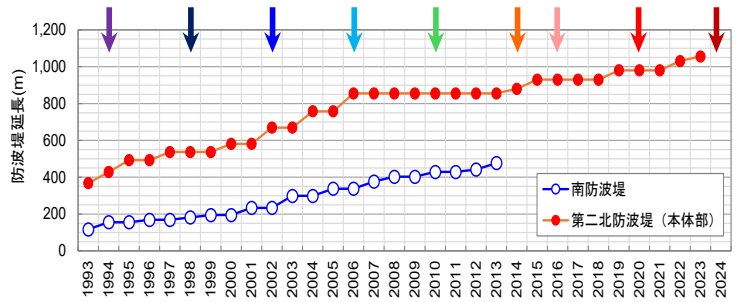


図-7 防波堤(南防波堤、第二北防波堤)の整備履歴

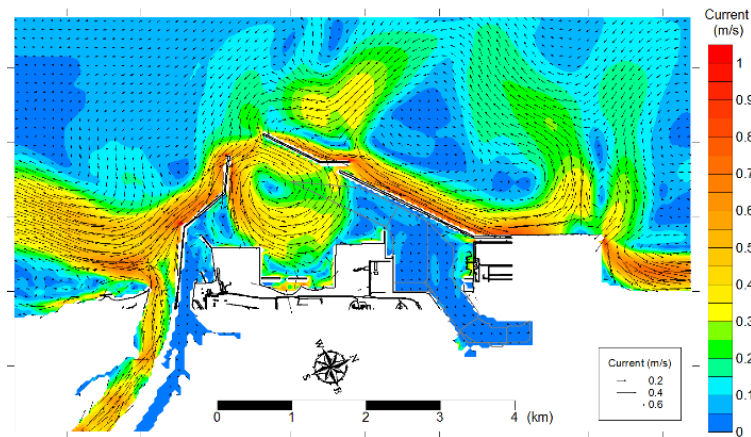
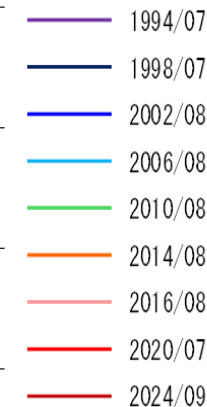


図-8 高波浪時の海浜流分布の計算例(波向=WNW)²⁾



2.4 地形変化の収束

港内の地形変化特性を定量的に把握するため、堆積変化と侵食変化の変化速度について着目した。図-9に示すように酒田港の沖防波堤新設予定位置から大浜海浜にかけて測線1を設定した。これは港内進入波の方向かつ計画航路を縦断する測線でもある。

図-10は測線上において、堆積による水深変化量が最も大きい港口部付近の水深変化速度を示したものである。出水の時期・規模と測量を実施した時期との関係により、各年の水深変化量が異なるものの、2003年頃までは変化量が少なく、2003年以降は変化速度が大きくなり、平均的には11.4cm/年の速度で堆積している。これは2.1で示したように港口部付近は最上川からの流下土砂(シルト質)により堆積傾向となるためである。この堆積した流下土砂のシルト分は、港口部に堆積し高波浪時の波浪・流れにより再浮上し、港奥に流入、堆積する傾向にある。

一方、図-11は測線上における、港内中央部の侵食による水深変化量が最も大きい地点の水深変化速度を示したものである。2020年ごろまでは、5.7cm/年の速度で侵食し、直近4年間の変化はほとんどなく、地形変化が収束しつつある可能性がある。これは、防波堤の延伸効果に港内波浪が抑制されていることに加えて、地形が継続的に侵食され、地形変化が生じない移動限界水深に達しつつあることが考えられる。

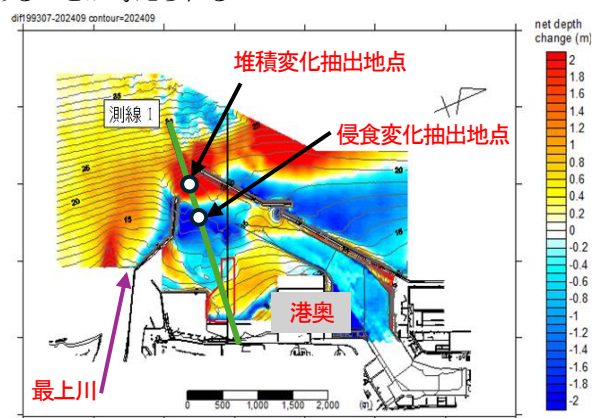


図-9 水深変化の抽出地点(1993年と2024年の水深差分図)

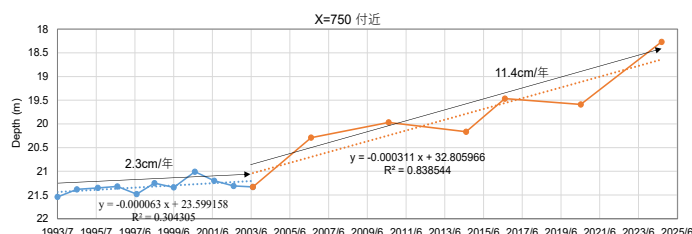


図-10 港口部付近の水深変化速度

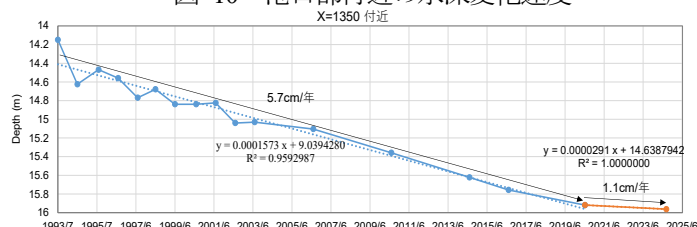


図-11 港内中央部付近の水深変化速度

2.5 漂砂要因分析のまとめ

酒田港内への土砂の流入・堆積については、隣接する最上川の流下土砂(シルト分)が港口部に堆積し冬季の高波浪時の波浪・流れにより再浮上し、港奥に流入、堆積することが要因と想定される。

例年、最上川では春季の融雪出水期には継続的な出水(4月の月平均流量1,000m³/s)が発生する。近年では春季の出水に加えて夏季(梅雨, 台風期)に短期間で大規模な出水が生じる傾向がある。ただし、大規模な出水が生じた場合でも防波堤の整備により、最上川からの流下土砂の港内への直接的な流入は抑制されている。このことは、出水後の現地の写真および港内(港奥の航路・泊地(-14m))のシルト分の堆積速度の分析からも確認された。

一方、流下土砂や海域の砂分については、港口部から酒田港内への供給はほとんど無く、港内で砂分の再配置が生じていると考察される。近年は防波堤延伸により港内波高が低下していることに加え、港内の侵食域の水深が移動限界水深に到達しつつあることが考えられるため、砂分による港内の地形変化が収束傾向となっている。

3. 漂砂予測検討

3.1 漂砂予測計算の計算手法

埋没予測の検討フローを図-12に示す。

酒田港の埋没は、春季融雪による出水時に最上川から流下したシルト分が港口部に堆積する。冬季の高波浪時の波浪・流れにより、堆積したシルト分が港内に流入・堆積する複雑な現象が想定された。よって、シルト分は冬季と春季の2季を対象に計算を実施した。砂分は河川からの流入はないため、冬季のみで実施した。

資料収集整理した深浅測量結果を用いて、計算格子データを作成し、外力となる河川流量、NOWPHAS酒田の波浪観測データを収集し、埋没予測モデルに必要な入力条件を設定した。入力条件をもとに、エネルギー平衡方程式法による波浪変形計算を実施した。

海浜流については、波浪変形計算結果から得られるラディエーション応力の空間分布を入力として、非線形長波式の平面2次元モデルを用いた。ここで、長周期波に関しては、海浜流計算の境界から長周期波の水位変動を与えた。水深変化は、流れの計算結果(河川流, 海浜流)より底質特性に応じた底面せん断応力を算定し、シルト分は移流拡散モデルを使用した。

(1) シルト分の移動モデル

$$\frac{\partial(Cd)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(CUd - K_x d \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(CVd - K_y d \frac{\partial C}{\partial y} \right) = P - D$$

ここで、 C は浮遊泥濃度、 d は全水深($=h+\eta$)、 K_x, K_y は水平方向の渦動拡散係数、 U, V は平均流速、 P は底質の巻上げフラックス、 D は底質の沈降フラックスである。

また、砂分は漂砂量式を用いて予測計算を行った。シルト分と砂分の予測計算はそれぞれ個別に行い、合成した。

(2) 砂分の移動モデル

$$q_{bx} = A_c \frac{\tau_{max} - \tau_{cr}}{\rho_w g} U + A_w F_d \frac{\tau_{max} - \tau_{cr}}{\rho_w g} u_w \cos \theta$$

$$q_{by} = A_c \frac{\tau_{max} - \tau_{cr}}{\rho_w g} V + A_w F_d \frac{\tau_{max} - \tau_{cr}}{\rho_w g} u_w \sin \theta$$

ここで、 q_{bx} 、 q_{by} は漂砂量のX方向及びY方向成分、 A_c は流れによる漂砂量係数、 A_w は波による漂砂量係数、 τ_{max} は波と流れによる底面せん断応力、 τ_{cr} は移動限界せん断応力、 U 、 V は平均流速、 u_w は波の底面軌道最大流速、 F_d は波による漂砂の方向、 θ は波向とX軸のなす角である。

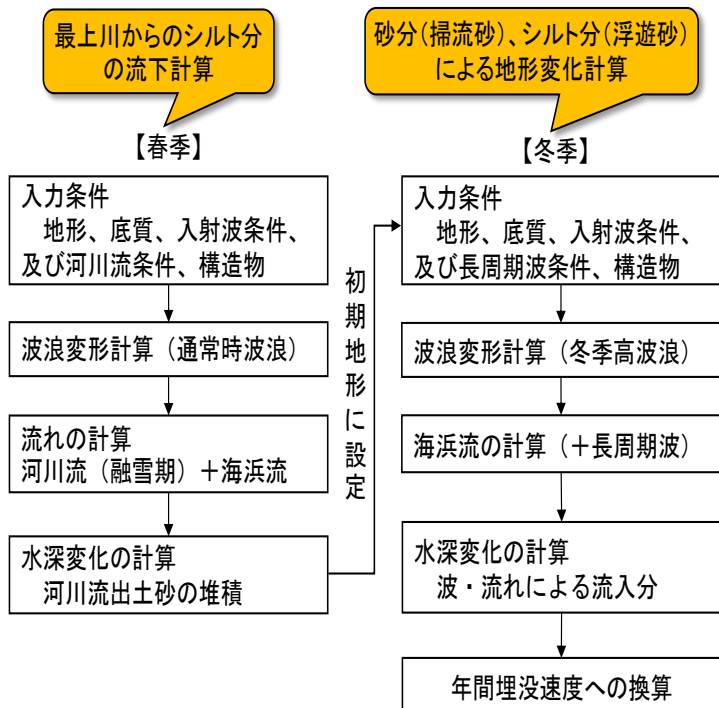


図-12 予測計算検討フロー

上記の予測モデルを用いて、図-11に示す移動限界水深に到達しつつある期間(2020年～2024年)を対象に再現計算を行い、モデルの妥当性を検証した。その上で、図-13に示す3ケース(ケース1:現況港形、ケース2:整備事業完了時、ケース3:港湾計画完了時)の港形に対して、泊地(-12m)、航路・泊地(-12m)の埋没予測計算を実施した。

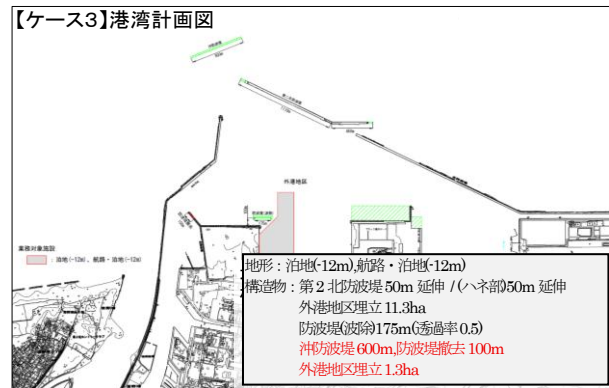
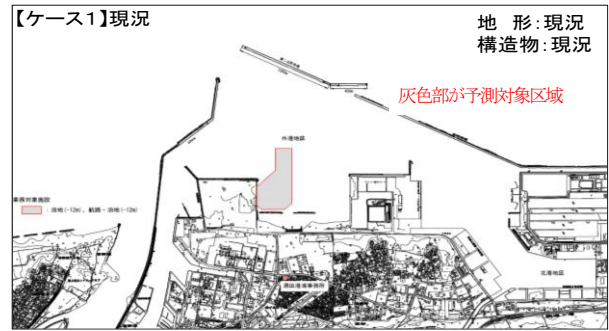


図-13 予測計算モデル(ケース1～3)

3.2 漂砂予測計算の合成結果

2.1で述べた波向毎と、高波浪の出現率(W:28% WNW:47%, NW:12%)を加重平均したケースで予測計算結果を算出した。冬季・春季で計算したシルト分の結果と冬季のみ計算した砂分の結果を合成した。ケースごとの平均水深変化量の予測計算結果を表-2に、ケースごとの埋没量の予測計算結果を表-3に示す。ケース2での埋没量は5.6cm/年、埋没土量は0.68万m³/年となり、この内訳は、砂分0.11万m³/年、シルト分0.57万m³/年となった。ケース3での埋没量は6.0cm/年、埋没土量は0.92万m³/年となり、ほとんどをシルト分が占める。

防波堤(波除)や沖防波堤の整備により港内静穏度が向上し、砂分の移動と泊地(-12m)、航路・泊地(-12m)の埋没が抑制される。一方、シルト分については、港内の静穏域や流れ場の変化の影響を受けやすく、港形によって埋没特性に変化が生じる。

表-2 泊地(-12m), 航路・泊地(-12m)の平均水深変化量の予測計算結果

平均水深変化(cm/年)				
【ケース1】現況	W	WNW	NW	合成
砂分(cm/年)	-0.3	-0.1	0.0	-0.2
シルト分(cm/年)	-1.4	-2.2	-1.4	-1.8
合計(cm/年)	-1.7	-2.3	-1.4	-1.9
【ケース2】整備事業完了時				
砂分(cm/年)	1.1	0.7	0.3	0.8
シルト分(cm/年)	5.7	4.5	4.3	4.9
合計(cm/年)	6.8	5.2	4.6	5.6
【ケース3】港湾計画完了時				
砂分(cm/年)	0.1	0.1	0.0	0.1
シルト分(cm/年)	6.6	5.7	5.0	5.9
合計(cm/年)	6.7	5.8	5.0	6.0

表-3 泊地(-12m), 航路・泊地(-12m)の埋没量の予測計算結果

埋没量 (m ³ /年)				
【ケース1】現況	W	WNW	NW	合成
砂分(m ³ /年)	-504	-227	-14	-287
シルト分(m ³ /年)	-2,365	-3,786	-2,366	-3,133
合計(m ³ /年)	-2,869	-4,013	-2,380	-3,419
【ケース2】整備事業完了時				
砂分(m ³ /年)	1,499	1,066	472	1,123
シルト分(m ³ /年)	6,679	5,162	5,640	5,717
合計(m ³ /年)	8,178	6,228	6,112	6,840
【ケース3】港湾計画完了時				
砂分(m ³ /年)	182	111	53	126
シルト分(m ³ /年)	9,668	9,168	8,010	9,169
合計(m ³ /年)	9,850	9,279	8,063	9,295

4. まとめ

4.1 結論

本論文の対象区域である泊地(-12m)および航路・泊地(-12m)は、防波堤の延伸に伴って地形変化は収束傾向にある。予測計算の結果、泊地(-12m)および航路・泊地(-12m)での土砂の堆積量は今後平均して年間5～6cm、最大で年

間10数cmと想定される。この土砂の内訳は主にシルト分であり、砂分はごくわずかであることが示された。

シルト分に関しては、酒田港の第二北防波堤および南防波堤の整備により、港内への直接的な流入が抑制されているものの、沖防波堤および波除堤の効果による静穏度の向上に伴い、沈降・堆積しやすくなったと推察される。また砂分に関しては、港外からの新たな流入はほとんど確認されず、沖防波堤および波除堤の効果により、砂分の移動が抑制され、堆積の要因であった砂分の再配置による堆積量が減少するものと考えられる。

今後の水深管理においては平均堆積速度が年間5～6cm程度と想定されるため、測量精度を考慮しナローマルチビームによる面的な測量が適切であると考えられる。

4.2 今後の課題

本論文では酒田港における漂砂予測要因と傾向の把握として隔年の深浅測量結果を用いた。浚渫維持管理の計画を行う上で、今後より精度の高い予測計算を行うために以下の課題が考えられる。

最上川の出水により発生する流下土砂の影響を把握し、より詳細な予測を行うため、数cmオーダーの変化量を捉えることが可能である砂面計を海底に設置し、海底面の変動を連続的に観測することが望ましい。地形変化が生じやすいと想定される冬季から春季の数ヶ月間の観測を行えば、堆積厚とその変化要因となる外力との関係を詳細に整理するデータが得られる。また、泊地(-12m)、航路・泊地(-12m)および防波堤(波除)の整備により、大浜海岸周辺の波浪、流れ場が変化することが想定される。これに伴い大浜海岸の汀線形状も変化する可能性が考えられる。泊地(-12m)、航路・泊地(-12m)のモニタリングと併せて、大浜海岸の地形のモニタリングおよび汀線変化の予測計算を実施し、施設の整備が大浜海岸の汀線の前進、後退に与える影響やその範囲を確認する必要がある。

謝辞

本稿は、東北地方整備局 酒田港湾事務所発注の酒田港漂砂予測検討業務における成果の一部をまとめたものである。酒田港漂砂予測に関する検討会の各委員、東北地方整備局の関係者から貴重なご意見、ご指導をいただきました。ここに厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 山形県県土整備部(R5.12.8) [https://www. pref. yamagata. jp/documents/4268/gaiyouban. pdf](https://www.pref.yamagata.jp/documents/4268/gaiyouban.pdf)
- 2) 東北地方整備局酒田港湾事務所発注業務 一般財団法人沿岸技術研究センター 平成26年度 酒田港埋没対策工法検討業務 報告書 平成27年3月。